

氏 名 钟 雷

学位（専攻分野） 博士（情報学）

学位記番号 総研大甲第 1428 号

学位授与の日付 平成 23 年 3 月 24 日

学位授与の要件 複合科学研究科 情報学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Cooperative Resource Allocation in Cellular Networks
with Multiple Antennas

論文審査委員 主 査 准教授 計 宇生
教授 漆谷 重雄
教授 中村 素典
教授 山田 茂樹
助教 CHEUNG, Gene
助教 林 海 大阪府立大学

Multi-antenna transmission and reception (a.k.a. MIMO) technology has evolved as one of the key enabling technologies to address the ever-increasing demand for high-speed wireless data access in current and emerging wireless cellular networks. From a systems point of view, multiple antennas are not necessarily limited to residing both at transmitting and receiving ends, and they can still be used to obtain a high system capacity by spatial division multiple access (SDMA) or cooperation by antennas among different nodes. In such cases, resource allocation in MIMO-enhanced cellular networks has been identified as one of the most important mechanisms to achieve this system capacity theoretically promised by MIMO techniques. Therefore, this dissertation addresses some critical problems with allocating resources efficiently and cooperatively in MIMO-enhanced cellular networks.

With the dramatic growth of mobile services provided by cellular networks, the first problem that we should confront is to support and differentiate diverse services, particularly the quality of services (QoS) guarantee for real-time services. Traditional algorithms for resource allocation in cellular networks either have only considered fairness without taken into consideration QoS requirements, or have had subjectively designed utility functions to fit the QoS model for individual services. However, both of these methods have failed to guarantee QoS optimally, since they have neglected competing and sharing characteristics between services from a systems perspective. In contrast, we have considered this problem based on game theory, which gives great insights into the nature of competing and cooperative relations. Consequently, we successfully formulated this problem on resource allocation as a cooperative game and obtained the notion of QoS guaranteed fairness based on the well known Nash bargaining solution. The algorithm based on QoS guaranteed fairness, can satisfy the QoS requirements of all services and still achieve a tradeoff between efficiency and fairness, which was tested and validated through simulations and is discussed at the end of Chapter 3. Moreover, this work also provides a theoretical framework that paves the way to solving resource allocation problems in other similar scenarios.

Moreover, the huge amount of traffic have highly saturated the bandwidth available by current cellular networks, which push us to utilize bandwidth more efficiently so that universal frequency reuse is usually required for future cellular networks. However, this raised the second problem, severe interference, particularly inter-cell interference (ICI), which has become the bottleneck in further enhancement of spectral efficiency. SDMA and other spatial multiplexing transmissions, whose main advantage is a dramatic improvement in spectral efficiency, lose much of their effectiveness due to this high level of interference. Fortunately, the advances in MIMO technique such as cooperative transmission, especially that between base stations (BS) within a cellular context, have emerged as one of the most promising techniques to mitigate ICI and thus improve total system throughput. We propose an algorithm in Chapter 4 for allocating wireless resources cooperatively, which is aimed at mitigating ICI and efficiently utilizing wireless resources. Based on game theoretic analysis, the proposed algorithm achieves Pareto optimal efficiency and considers proportional fairness. Due to the prohibitive complexity of computation, we also developed a heuristic algorithm and compared it with a benchmark that was regarded as a Nash equilibrium outcome in a non-cooperative scenario. The simulation and analysis results are also given at the end of Chapter 4.

We also investigated another scenario discussed in Chapter 5 that has a topology of distributed antennas at a BS. The intuitive advantages of this architecture are better signal coverage and lower power consumption.

However, we expect to further exploit other advantages since resource allocation with distributed antennas is more flexible in cooperation and optimization than that in traditional architectures. We propose a cooperative beamforming algorithm that mitigates ICI and achieves a higher system capacity. A comparison and analysis of performance between a scenario with co-located antennas and that with distributed antennas are given, which clearly demonstrate the advantages of the architecture with distributed antennas.

In summary, we investigated some cooperative problems on resource allocation in the MIMO-enhanced cellular networks. We propose a game theoretic framework to guarantee QoS for diverse services and developed cooperative resource allocation both optimal and heuristic to solve the interference problem. We also improved the system throughput between cells. Finally, we discuss our investigations into a promising architecture with distributed antennas at a BS that outperforms the traditional cellular architecture.

博士論文の審査結果の要旨

本博士論文は「Cooperative Resource Allocation in Cellular Networks with Multiple Antennas (複数のアンテナを有するセルラーネットワークにおける協調的資源割当)」と題し、MIMO (Multiple Input Multiple Output) 技術を利用した無線セルラーネットワークにおいて、高い性能と効率性を提供し、セル間の干渉を低減させることを目的としたチャネル資源の割当問題について研究を行ったものである。MIMO 技術は、無線通信の送信および受信側で複数のアンテナを利用することによって、通信容量と電波効率を向上させる技術であり、次世代無線通信の重要な技術の一つでもある。本研究では、ゲーム理論を応用して通信サービスの品質を保証するフレームワークを提案し、チャネル間の干渉を削減するための協調的資源割当のアルゴリズムを提案している。

論文は6章から構成され、第1章及び第2章の研究の目的と協調的資源割当の技術背景に続いて、第3章から第5章では、複数のアンテナを有する無線ネットワークの異なるシステム環境における協調的資源割当アルゴリズムの研究内容と結果について述べている。

第3章では、単一セルのシステム環境において、サービス品質 (QoS) が保証された公平性を実現する協調的資源割当について述べている。ここでいうQoSの保証された公平性とは、リアルタイムなどのサービス品質を可能な限り保証すると同時に、スループットの効率性と公平性を同時に考慮した比例公平の原則に基づき資源の割当を行うことであり、ゲーム理論における協力ゲームモデルに対するナッシュ交渉解から目標関数を導出している。それに基づき、資源割当問題を組合せ最適化問題として数式化した。シミュレーションによる性能比較の結果、標準の比例公平や最大待ち時間優先に基づくものよりもリアルタイムサービスに優れた性能を提供することを示した。

第4章では、マルチセルのシステム環境において、セル間の協調によって比例公平と干渉抑制を実現する資源割当方法について述べている。まず、マルチセルのMIMOシステムにおけるセル間の干渉のモデルを定義し、セル間干渉を抑制するための資源割当方法を最適化問題として数式化した。それに対する最適解を求めたうえで、さらにシステムスループットの僅かな低減で計算複雑度を削減できるアルゴリズムを提案した。シミュレーションによって提案方式がシステムの性能上限に近いことが確認され、また、干渉抑制の効果についても確認した。

第5章では、基地局の複数のアンテナを分散して配置した分散アンテナ (分散MIMO) の環境において、セル間干渉を軽減するための基本的なフレームワークを提案した。このようなアンテナの配置は、カバレッジの強化や電力消費の削減に有利であることが知られている。ここでは、セル間干渉の低減とシステム容量の向上を実現するために協調的ビームフォーミングのアルゴリズムを提案し、アンテナを集中的に配置した場合や、分散アンテナで最大伝送レートのみを採用する場合などに比べて高いスループットと干渉耐性を有することを解析およびシミュレーションによって示した。

また、第6章では結論として、本論文のコントリビューションについてまとめ、同分野における今後の研究課題を提示した。

なお、研究成果として、出願者は主著で電子情報通信学会論文誌論文1篇、査読付国際会議3篇 (他共著1篇)、その他3件を発表している。

以上を要するに、本論文は MIMO 技術を利用したセルラーネットワークの性能を大きく左右する無線チャネルの資源割当とチャネル間の干渉抑制の問題について、異なる利用シナリオにおける協調的資源割当のフレームワークを提案し、その有効性を示したものであり、次世代無線通信ネットワークの実現による情報通信の機能性、利便性の向上に貢献するところが大きい。よって、本論文は博士の学位請求論文として合格と認められる。